

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»



**РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК
ТРАНСФОРМАТОРІВ, ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ТА АПАРАТІВ**

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ, РОЗРАХУНКОВІ ЗАВДАННЯ
І МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ З ДИСЦИПЛІНИ
«ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА АПАРАТИ»

для студентів
навчально-наукового інституту енергетики, електроніки
та електромеханіки

Харків 2019

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**

**РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК
ТРАНСФОРМАТОРІВ, ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ТА АПАРАТІВ**

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ, РОЗРАХУНКОВІ ЗАВДАННЯ
І МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ З ДИСЦИПЛІНИ
«ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА АПАРАТИ»

для студентів
**навчально-наукового інституту енергетики, електроніки
та електромеханіки**

Затверджено
редакційно - видавницькою
радою університету,
протокол № 2 від 17.05.2019 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2019

Розрахунок характеристик трансформаторів, електричних машин та апаратів. Контрольні питання, розрахункові завдання і методичні вказівки з дисципліни «Електричні машини і апарати» для студентів навчально-наукового інституту енергетики, електроніки та електромеханіки /укладачі Шевченко В.В., Дунєв О.О. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – 32 с.

Укладачі: В.В. Шевченко,
О.О. Дунєв

Рецензент: С.Ю. Шевченко

Кафедра електричних машин

ВСТУП

Методичні вказівки містять матеріали для виконання студентами розрахункового завдання «Розрахунок характеристик трансформаторів, електричних машин та апаратів» з дисципліни «Електричні машини і апарати».

Метою роботи є закріплення теоретичних знань та відпрацювання практичних навичок розрахунку характеристик трансформаторів, електричних машин і апаратів. Тобто об'єктами дослідження є трансформатори і електричні машини - основне електрообладнання всіх енергетичних систем (електростанцій, підстанцій, систем електропостачання) і електроприводів промислових і сільськогосподарських виробництв, побутової, медичної техніки, транспорту.

Предметом вивчення даного курсу є електричні машини різних видів (генератори і двигуни), силові трансформатори та основні електричні апарати.

В результаті виконання завдань студент повинен знати конструкції, основні елементи, принцип дії та характеристики електричних машин, трансформаторів та електричних апаратів, особливості пуску електродвигунів, способи регулювання їх частоти обертання, реверсу і гальмування, особливості роботи апаратів. Студент повинен вміти оцінювати технічні та економічні показники вказаного електрообладнання.

У виданні наведені завдання по розділам дисципліни, зазначено, як студенту вибрати варіант для їх виконання: По кожному розділу наведені чисельні дані для задач і методичні вказівки для їх вирішення.

Розрахункові завдання є підсумковим документом роботи студента з дисципліни. До іспиту звіт про роботу повинен бути повністю оформлений і захищений. Конкретний обсяг робіт уточнює викладач, який веде курс лекцій за вказаною дисципліни.

Звіт починається з титульного аркуша, зразок оформлення якого наведено в додатку А. Подальший план роботи визначається текстом кожного завдання. Відповіді на теоретичні питання і рішення задач наводяться після вказівки пункту завдання. Рішення слід виконувати докладно, за формою, наведеною в методичних вказівках. Спочатку слід описати, що розраховується, записати формулу в буквенному, а потім в чисельному вигляді. Обов'язково вказувати розмірності отриманих величин. Схеми, векторні діаграми і графіки слід будувати відповідно до правил їх побудов, на міліметрівці або папері в клітинку, з зазначенням на осях стандартних літерних позначень величин та одиниць їх вимірювання. Допускається використовувати рисунки, виконані за допомогою розмножувальної техніки.

1 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТРАНСФОРМАТОРІВ В НОМІНАЛЬНОМУ РЕЖИМІ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВИПРОБУВАНЬ В РЕЖИМАХ НЕРОБОЧОГО ХОДУ ТА ЛАБОРАТОРНОГО КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

1.1 Теоретичне завдання

1. Скласти схему «Класифікація трансформаторів».
2. Виконати ескіз трифазного двообмоткового трансформатора з масляним охолодженням, позначити основні елементи, описати їх призначення.
3. Виконати ескізи основних конструкцій осердь і обмоток силових трансформаторів.
4. Записати умови включення трифазних трансформаторів на паралельну роботу. Проаналізувати, що буде, якщо не виконується одна із зазначених умов.
5. Письмово дати визначення поняттям: коефіцієнт трансформації трансформатора; схеми і групи з'єднання обмоток трифазних трансформаторів; напруга короткого замикання трансформатора, струм неробочого ходу.

1.2 Задача

Для трифазного трансформатора ($m = 3$, де m – кількість фаз), який працює в мережі з частотою напруги $f = 50$ Гц і має дані, наведені в табл. 1 та на рис. 1, розрахувати параметри і побудувати схеми заміщення в режимах неробочого ходу, лабораторного короткого замикання (КЗ) та в номінальному режимі, позначити чисельні значення опорів, напруг, ЕРС та струмів, які позначено на рис. 2.

Розрахувати і побудувати характеристики неробочого ходу трансформатора $P_o(U_{po})$, $I_{po}(U_{po})$, $\cos\varphi_{po}(U_{po})$ і лабораторного короткого замикання $P_k(U_{pk})$, $I_{pk}(U_{pk})$, $\cos\varphi_{pk}(U_{pk})$, тобто залежності потужностей, первинних струмів та коефіцієнтів потужності від первинної напруги для зазначених режимів.

Таблиця 1 – Параметри трифазних трансформаторів

Номер варіанту	Номінальна повна потужність	Номінальна напруга первинної обмотки	Номінальна напруга вторинної обмотки	Кількість витків вторинної обмотки	Ефективна площа поперечного перерізу стрижня	Площа поперечного перерізу яра	Висота стрижня	Висота яра	Відстань між осями стрижнів	Напруга короткого замикання.	Коефіцієнт потужності навантаження	Втрати потужності в режимі лабораторного КЗ	Схеми і групи з'єднання обмоток
	S_N , кВ·А	U_{pNI} , кВ	U_{sNI} , кВ	N_s	S_c , см ²	S_j , см ²	h_c , см	h_j , см	l_1 , см	u_k , %	$\cos\phi_l$, в.о.	P_k , кВт	
1	50	6,0	0,525	192	89	90	25	12	25	5,5	0,82	1,70	Y/Δ-11
2	100	35,0	6,3	200	580	570	41	14	35	6,5	0,82	4,90	Y/ Y-0
3	180	31,5	6,3	280	410	400	52	16	39	6,5	0,83	4,60	Y/ Y-0
4	320	35,0	6,3	360	330	326	39	18	35	5,5	0,80	5,60	Y/ Y-0
5	5600	110,0	10,5	200	580	570	72	19	45	6,5	0,81	47,8	Y/ Y-0
6	1000	35,0	0,69	470	220	210	83	41	46	5,5	0,80	18,54	Y/Δ-11
7	1800	35,0	6,3	640	310	300	85	28	57	6,5	0,85	24,22	Y/Y-0
8	3200	35,0	6,3	660	300	310	100	31	62	7,0	0,84	36,5	Y/Y-0
9	5600	35,0	6,3	600	320	300	110	37	70	7,5	0,85	49,6	Y/Y-0
10	20	6,0	0,40	100	75	72	30	19	21	5,5	0,83	0,95	Y/Y-0
11	60	35,0	6,3	200	580	600	41	34	31	6,5	0,83	0,53	Y/Y-0
12	100	35,0	0,66	150	86	84	38	34	46	5,5	0,80	1,46	Y/Y-0
13	180	35,0	3,15	300	200	180	42	36	49	5,5	0,84	5,60	Y/Y-0
14	320	35,0	6,3	330	350	340	63	47	51	6,5	0,85	7,23	Y/Y-0
15	20	10,0	0,69	380	322	316	40	50	20	6,5	0,83	0,94	Y/Y-0
16	180	10,0	0,69	388	300	310	35	26	24	5,5	0,83	5,24	Y/Δ-11
17	560	35,0	6,3	400	290	280	42	49	44	6,5	0,80	9,30	Y/Δ-11
18	1000	35,0	10,5	390	300	290	56	52	50	6,5	0,80	15,12	Y/Y-0
19	50	6,0	3,15	400	280	270	25	22	25	5,5	0,85	3,14	Δ/Y-11
20	100	10,0	3,15	600	320	310	41	24	35	6,5	0,84	5,04	Y/Y-0

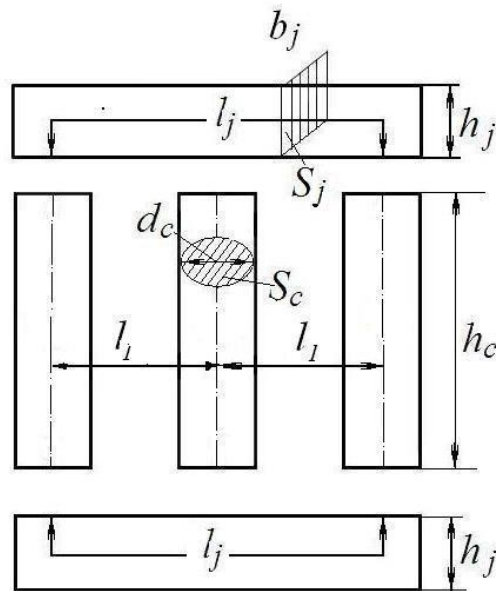


Рисунок 1 – Розміри осердя трансформатора

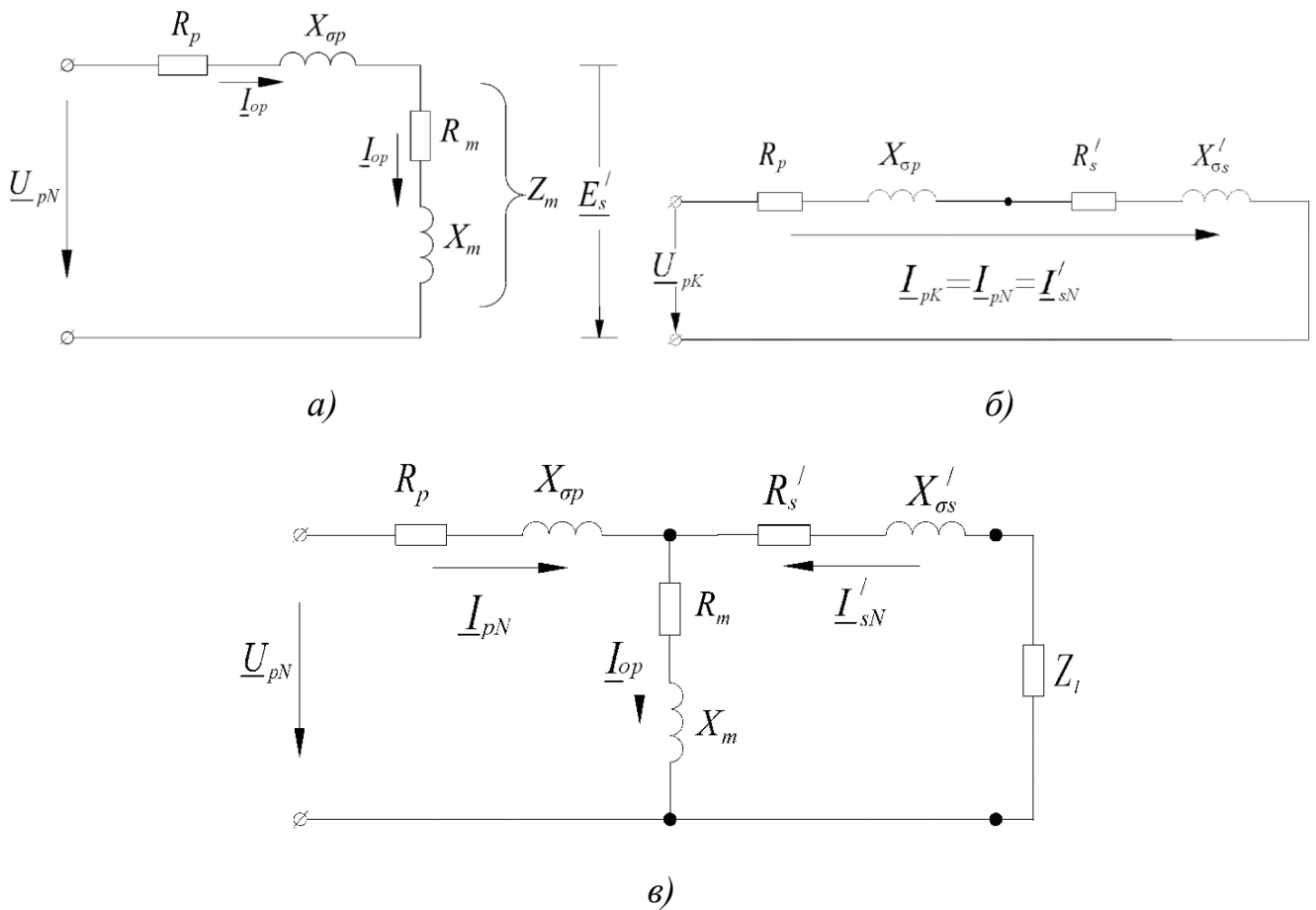


Рисунок 2 – Схеми заміщення трансформатора в режимах:
 а – неробочий хід, б – лабораторне коротке замикання;
 в – номінальний режим

Розрахувати номінальне значення коефіцієнту корисної дії (ККД) трансформатора і значення навантаження (у частинах від номінальної потужності), при якому ККД трансформатора досягає максимального значення. Визначити максимальне значення ККД і порівняти його з номінальним значенням.

Примітка: у розділі прийняті позначення:

- первинна обмотка – індекс p (*prime*);
- вторинна обмотка – індекс s (*second*);
- активний опір R_p і реактивний опір розсіювання $X_{\sigma p}$ первинної обмотки;
- зведений активний опір R'_s і зведений реактивний опір розсіювання $X'_{\sigma s}$ вторинної обмотки;
- активний R_m та реактивний X_m опори вітки намагнічування.

1.3 Методичні вказівки для розв'язання задачі

Розрахуйте номінальні фазні значення первинних $U_{\phi pN}$ і вторинних $U_{\phi sN}$ напруг трансформатора за наведеними в табл.1 значенням лінійних напруг (U_{pN} і U_{sN} відповідно). У подальших розрахунках використовуйте тільки значення фазних напруг.

Визначте магнітний потік в осерді трансформатора:

$$\Phi = \frac{U_{\phi sN}}{4,44 \cdot f \cdot N_s}.$$

Визначте магнітну індукцію в стрижнях B_c і ярмах трансформатора B_j :

$$B_c = \frac{\Phi}{k_{Fe} \cdot S_c}; \quad B_j = \frac{\Phi}{k_{Fe} \cdot S_j},$$

де k_{Fe} – коефіцієнт заповнення сталлю осердя трансформатора, який при ізоляції сталевих листів лаком дорівнює 0,95.

Отримані значення магнітних індукцій повинні знаходитись в інтервалі від 1,3 Тл до 1,6 Тл. Якщо отримані значення виходять за цей інтервал, запропонуйте, як необхідно змінити площу поперечного перерізу стрижнів і ярм трансформатора. Вашу пропозицію підтвердить розрахунками:

1) виберіть значення магнітних індукцій із зазначеного інтервалу, перерахуйте площу поперечного перерізу стрижнів S_c і ярм S_j трансформатора:

$$S_c = \frac{\Phi}{k_{Fe} \cdot B_c}; \quad S_j = \frac{\Phi}{k_{Fe} \cdot B_j}.$$

При розрахунках ступінчастістю перерізу стрижнів нехтуємо. Вважаємо, що S_c – ефективна площа поперечного перерізу стрижня, м²;

2) розрахуйте діаметр стрижнів d_c , використовуючи значення перерізу стрижня S_c (заданого або перерахованого):

$$d_c = \sqrt{\frac{4S_c}{\pi}}.$$

Якщо Ви перераховували переріз ярем, то слід уточнити нове значення висоти ярем h_j . (При перерахунку поперечного перерізу ярма прийняти, що його ширина b_j дорівнює значенню діаметра стрижня d_c):

$$h_j = \frac{S_j}{b_j}.$$

Отримані значення площ перерізів, діаметр стрижня d_c та висоту ярма h_j використовуйте у подальших розрахунках.

Визначте напруженість магнітного поля в стрижнях і ярмах (H_c і H_j , відповідно) для електротехнічної сталі 3411, згідно даним табл.2. Розрахуйте магніто-рушійну силу (МРС) на фазу трансформатора. При розрахунках необхідно враховувати МРС для повітряних проміжків в стиках стрижнів і ярем трансформаторів. Кількість стиків на одну фазу вважають рівною 7/3 та приймають сумарну величину повітряних проміжків $\delta = 5 \cdot 10^{-5}$ м. Довжина силової лінії магнітного поля в ярмі трансформатора

$$l_j = 2 \cdot l_1 + h_j.$$

Таблиця 2 – Напруженість магнітного поля H і питомі магнітні втрати потужності p_{mag} для електротехнічної сталі 3411 залежно від магнітної індукції B

B , Тл	0	0,2	0,4	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
H , А/м	0	64	127	190	260	318	397	502	647	843	1140	1580	2500	4370
p_{mag} , Вт/кг	0	0,1	0,24	0,54	0,61	0,76	0,96	1,20	1,46	1,76	2,10	2,45	2,80	3,37

Розрахуйте середнє значення МРС F_a для однієї фази, визначивши шляхи проходження магнітного потоку в ярмах і стрижнях (рис.2):

$$F_a = H_c \cdot h_c + \frac{2}{3} H_j \cdot l_j + \frac{7}{3} \cdot \frac{B_c}{\mu_0} \cdot \delta,$$

де μ_0 – магнітна постійна, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Прийняти, що магнітна індукція в стиках ярем і стрижнів дорівнює магнітній індукції в стрижнях. За даними табл. 2 побудуйте графіки залежності $H(B)$ і $p_{mag}(B)$. Це дозволить вибрати більш точні значення напруженості і питомих магнітних втрат в залежності від значення магнітної індукції.

Визначте кількість витків первинної обмотки трансформатора:

$$N_p = \frac{N_s \cdot U_{\phi p N}}{U_{\phi s N}}.$$

Пам'ятайте, що кількість витків повинна бути цілим числом.

Визначте реактивну складову намагнічуючого струму:

$$I_{por} = \frac{F_a}{\sqrt{2} \cdot k_g \cdot N_p},$$

де k_g – коефіцієнт, який враховує наявність вищих гармонік в намагнічуючому струмі (значення k_g знаходиться у межах 1,5–2,2).

Маса стали стрижнів m_c і ярем m_j трансформатора:

$$m_c = n_c \cdot S_c \cdot h_c \cdot \gamma_{Fe} \cdot k_{Fe}; \quad m_j = n_j \cdot S_j \cdot l_y \cdot \gamma_{Fe} \cdot k_{Fe},$$

де l_y – довжина ярма:

$$l_y = 2 \cdot l_1 + d_c;$$

n_c і n_j – кількість стрижнів і ярем осердя трансформатора, відповідно,

$$n_c = 3; \quad n_j = 2;$$

γ_{Fe} – питома маса сталі, яка становить $7,8 \cdot 10^3$ кг/м³.

Магнітні втрати потужності в осерді трансформатора (разом основні і додаткові):

$$P_{mag} = (k_d + 1) \cdot (p_{magc} \cdot m_c + p_{magj} \cdot m_j),$$

де p_{magc} , p_{magj} – питомі втрати потужності в стрижнях и ярмах трансформатора, Вт/кг, (питомі втрати потужності обирайте з табл.2 згідно до значення магнітної індукції за залежністю $p_{mag}(B)$);

k_{ad} – коефіцієнт додаткових втрат (P_{ad}) вибираємо з діапазону 0,1–0,15.

Активна складова струму неробочого ходу:

$$I_{poa} = \frac{P_{mag}}{m \cdot U_{\phi p N}}.$$

Повний струм неробочого ходу первинної обмотки і коефіцієнт потужності трансформатора в режимі неробочого ходу:

$$I_{po} = \sqrt{I_{por}^2 + I_{poa}^2}; \quad \cos \varphi_{po} = \frac{P_{mag}}{m \cdot U_{\phi p N} \cdot I_{po}}.$$

Параметри схеми заміщення трансформатора (рис.2, а) в режимі неробочого ходу, а саме, повний, активний та реактивний опори:

$$Z_o = \frac{U_{\varphi pN}}{I_{po}} ; \quad R_o = \frac{P_{mag}}{m \cdot I_{po}^2} ; \quad X_o = \sqrt{Z_o^2 - R_o^2} .$$

Щоб визначити всі параметри схеми заміщення трансформатора використовують також режим лабораторного КЗ, а для цього попередньо визначаємо напругу КЗ:

$$U_{\varphi pk} = \frac{u_k}{100 \% } \cdot U_{\varphi pN} ,$$

та номінальний струм первинної обмотки:

$$I_{pN} = \frac{S_N}{m \cdot U_{pN}} .$$

Тоді для варіанту схеми заміщення на рис.2, б маємо повний, активний та реактивний опори трансформатора в режимі КЗ:

$$Z_k = \frac{U_{\varphi pk}}{I_{pN}} ; \quad R_k = \frac{P_k}{m \cdot I_{pN}^2} ; \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} .$$

Коефіцієнт потужності трансформатора в режимі лабораторного КЗ:

$$\cos \varphi_{pk} = \frac{P_k}{m \cdot U_{\varphi pk} \cdot I_{pN}} .$$

Параметри схеми заміщення трансформатора в номінальному режимі:

- активний опір первинної обмотки дорівнює зведеному значенню активного опору вторинної обмотки трансформатора, тому за рис.2, б:

$$R_p = R'_s = \frac{R_k}{2} ;$$

- реактивний опір первинної обмотки дорівнює зведеному значенню реактивного опору вторинної обмотки трансформатора, тому за рис.2, б:

$$X_{\sigma p} = X'_{\sigma s} = \frac{X_k}{2} ;$$

- опори вітки намагнічування трансформатора за рис.2, а:

$$R_m = R_o - R_p ; \quad X_m = X_o - X_{\sigma p} .$$

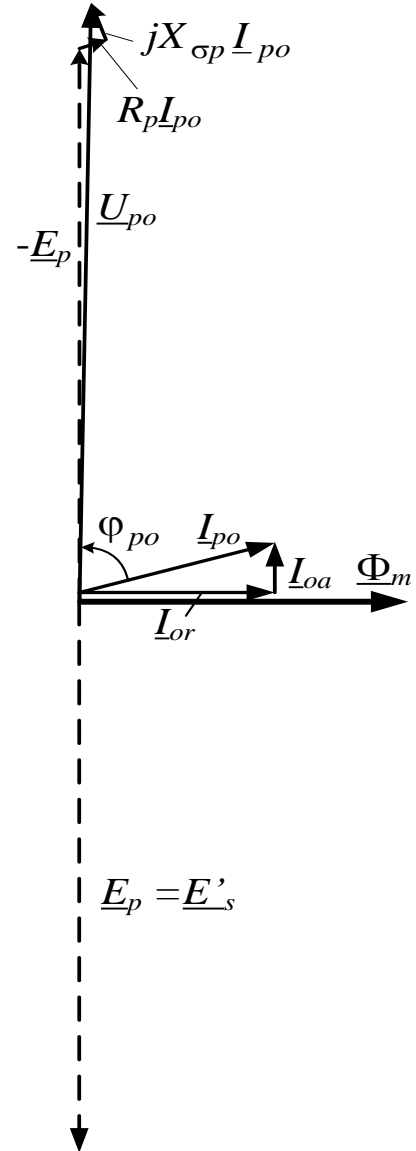


Рисунок 3 – Векторна діаграма трансформатора в режимі неробочого ходу

Зведене значення ЕРС взаємодуції вторинної обмотки трансформатора E_s' (рис.2, в) отримаєте із векторної діаграми трансформатора в режимі неробочого ходу (рис. 3), яку слід побудувати у масштабі.

Коефіцієнт корисної дії трансформатора при номінальному навантаженні,

$$\eta_N = 1 - \frac{P_o + \beta_{Is}^2 \cdot P_k}{\beta_{Is} \cdot S_N \cdot \cos \varphi_l + P_o + \beta_{Is}^2 \cdot P_k},$$

де P_o – втрати потужності в режимі неробочого ходу, які є магнітними втратами потужності в магнітопроводі трансформатора, тобто $P_o = P_{mag}$;

β_{Is} – коефіцієнт струму навантаження трансформатора, а саме:

$$\beta_{Is} = \frac{I_s}{I_{sN}},$$

(при номінальному навантаженні, природно, $\beta_{Is} = \beta_{IsN} = 1$);

I_s – струм вторинної обмотки трансформатора, (струм навантаження);

I_{sN} – номінальний струм вторинної обмотки трансформатора.

Максимальне значення ККД трансформатора досягається, коли постійні втрати потужності дорівнюють змінним втратам. Значення коефіцієнту струму навантаження, при якому ККД максимальний:

$$\beta_{Is \max} = \sqrt{\frac{P_o}{P_k}}.$$

Тоді максимальне значення ККД трансформатора:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{P_o + \beta_{Is \max}^2 \cdot P_k}{\beta_{Is \max} \cdot S_N \cdot \cos \varphi_l + P_o + \beta_{Is \max}^2 \cdot P_k}.$$

Порівняйте номінальне і максимальне значення ККД трансформатора. Поясніть недоцільність проектування трансформаторів з максимальним ККД при номінальному навантаженні ($\beta_{Is} = 1$).

Побудуйте характеристики неробочого ходу $P_o(U_{\phi po})$, $I_{po}(U_{\phi po})$, $\cos \varphi_{po}(U_{\phi po})$ і лабораторного КЗ трансформатора $P_k(U_{\phi pk})$, $I_{pk}(U_{\phi pk})$, $\cos \varphi_{pk}(U_{\phi pk})$. Для цього повторіть розрахунки параметрів трансформатора в режимах неробочого ходу та лабораторного КЗ для відносних значень напруги в частках від $U_{\phi pN}$:

$$U_{\phi po*} = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,1; \quad U_{\phi pk*} = 0,02; 0,04; 0,06; 0,08; 0,1.$$

Результати розрахунків занесіть в табл. 3 і 4 (числа в таблицях вказані для прикладу). При розрахунку параметрів КЗ вважайте, що струм КЗ змінюється лінійно через відсутність насичення.

Таблиця 3 – Розрахункові значення для побудови характеристик неробочого ходу трансформатора

Величини	Значення					
$U_{\text{про*}}, \text{В.О.}$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,1
$U_{\text{фр}} = U_{\text{про*}} \cdot U_{\text{фрN}}, \text{В}$	4040	8080	12120	16170	20210	22270
$U_{\text{фс}} = U_{\text{про*}} \cdot U_{\text{фсN}}, \text{В}$	700	1400	2080	2770	3470	3810
$\Phi = \frac{U_{\text{фс}}}{4,44 \cdot f \cdot N_s}, \text{Вб}$	0,010	0,019	0,028	0,038	0,047	0,052
$B_c = \frac{\Phi}{k_{\text{Fe}} \cdot S_c}, \text{Тл}$	0,27	0,54	0,81	1,08	1,35	1,49
$B_j = \frac{\Phi}{k_{\text{Fe}} \cdot S_j}, \text{Тл}$	0,28	0,56	0,83	1,11	1,39	1,53
$H_c = f(B_c), \text{А/м}, \quad \text{з табл. 2}$	86	171	322	658	1184	2480
$H_j = f(B_j), \text{А/м}, \quad \text{з табл. 2}$	88	174	411	677	1568	2550
$F_a = H_c \cdot h_c + \frac{2}{3} H_j \cdot l + \frac{7}{3} \cdot \frac{B_c}{\mu_0} \cdot \delta, \text{А}$	167	331	687	1187	2429	4233
$I_{\text{пор}} = \frac{F_a}{\sqrt{2} \cdot k_g \cdot N_p}, \text{А}$	0,041	0,081	0,168	0,291	0,595	1,037
$p_{\text{mag c}}, \text{Вт/кг}, \quad \text{з табл. 2}$	0,25	0,50	0,76	1,4	2,25	2,4
$p_{\text{mag j}}, \text{Вт/кг}, \quad \text{з табл. 2}$	0,27	0,54	0,79	1,45	2,32	2,5
$P_{\text{mag}} = (k_d + 1) \times (p_{\text{magc}} \cdot m_c + p_{\text{magj}} \cdot m_j), \text{Вт}$	332	663	1051	2020	2976	3344
$I_{\text{поа}} = \frac{P_{\text{mag}}}{m \cdot U_{\text{фрN}}}, \text{А}$	0,005	0,01	0,017	0,033	0,049	0,055
$I_{\text{по}} = \sqrt{I_{\text{пор}}^2 + I_{\text{поа}}^2}, \text{А}$	0,041	0,082	0,169	0,292	0,596	1,040
$\cos \varphi_{\text{по}} = \frac{P_{\text{mag}}}{m \cdot U_{\text{фрN}} \cdot I_{\text{по}}}$	0,122	0,120	0,10	0,113	0,082	0,052

Таблиця 4 – Розрахункові значення для побудови характеристик лабораторного КЗ трансформатора

Величини	Значення				
$U_{\text{фрк*}}, \text{В.О.}$	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10
$U_{\text{фрк}} = U_{\text{фрк*}} \cdot U_{\text{фрN}}, \text{В}$	404	808	1212	1616	2020
$I_{\text{рк}} = U_{\text{фрк*}} \cdot I_{\text{рN}}, \text{А}$	0,99	1,98	2,97	3,96	4,95
$P_k = m \cdot I_{\text{рк}}^2 \cdot R_k, \text{Вт}$	447	1788	4022	7151	11173
$\cos \varphi_{\text{рк}} = \frac{P_k}{m \cdot U_{\text{фрк}} \cdot I_{\text{рN}}}$	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35

2 ЕНЕРГЕТИЧНА ДІАГРАМА ТА ВИБІР ПУСКОВИХ РЕОСТАТІВ ДЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

2.1 Задачі

Задача № 1

Побудувати за даними табл. 5 енергетичну діаграму трифазного ($m_s = 3$ – кількість фаз) асинхронного двигуна (АД) з фазним ротором, рис. 4. Обмотка статора з'єднана в «зірку» (Y). Частота напруги в мережі $f = 50$ Гц.

Задача № 2

Вибрати для трифазного АД з фазним ротором, дані якого приведено в табл. 5, триступеневий пусковий реостат, який забезпечить пуск двигуна зі значенням струму, який не перевищує двох значень номінального струму ($I'_{r1} = 2I'_{rN}$).

Побудувати по чотири пускові характеристики $M, I_r'(s)$: природну, з одним, двома і трьома ступенями реостата. Письмово вказати, які у АД є проблеми при пуску і як їх вирішують (з урахуванням конструкції ротора: короткозамкнений або фазний). Прийняти значення активних та зведених індуктивних опорів розсіювання обмоток ротора і статора:

$$R'_r = \frac{1}{4} \cdot R_k; \quad R_s = \frac{3}{4} \cdot R_k; \quad X'_r = \frac{1}{3} \cdot X_k; \quad X_s = \frac{2}{3} \cdot X_k.$$

Таблиця 5 – Дані асинхронних двигунів

Номер варіанту	Номінальна потужність	Кількість пар полюсів	Номінальне ко- взання	Номінальна напруга обмотки статора	Номінальний ККД	Номінальний коефіцієнт потужності	Результати дослідження лабораторного КЗ:	
							реактивний опір	активний опір
	P_N , кВт	p	s_N , %	U_N , кВ	η_N , %	$\cos\varphi_N$	X_k , Ом	R_k , Ом
1	10	4	4,3	0,38	80,5	0,87	1,8	0,26
2	15	3	2,7	0,38	80,0	0,83	2,0	0,26
3	20	2	3,1	0,38	81,8	0,73	1,8	0,23
4	30	1	3,5	0,38	83,0	0,74	2,4	0,45
5	40	3	2,0	0,66	86,5	0,89	2,6	0,21
6	50	2	3,0	0,66	85,5	0,86	2,7	0,90
7	75	1	3,2	0,66	87,5	0,81	2,9	1,08
8	11	4	4,7	0,38	88,0	0,75	2,0	0,48
9	15	1	2,3	0,38	90,0	0,91	2,6	0,81
10	18,5	2	2,7	0,38	90,0	0,88	2,8	0,84
11	22	3	2,5	0,38	89,0	0,90	2,9	0,85
12	30	4	2,0	0,66	90,5	0,81	2,9	1,24
13	37	5	1,8	0,66	90,5	0,81	2,6	1,10
14	45	3	2,5	0,66	91,0	0,75	2,5	1,18
15	55	3	2,5	0,66	92,5	0,78	2,9	0,95
16	75	3	2,2	0,66	92,5	0,82	3,0	1,08
17	90	3	2,5	0,66	93,0	0,86	3,6	1,25
18	110	3	2,2	0,66	94,0	0,89	4,9	2,53
19	132	2	2,0	0,66	94,0	0,89	5,2	2,48
20	160	1	1,65	0,66	94,0	0,90	5,6	2,42

2.2 Методичні вказівки до розв'язання задач

2.2.1 Методичні вказівки до розв'язання задачі №1

Перетворення електричної енергії на механічну в АД, як і в інших електричних машинах, пов'язане з втратами енергії, тому корисна потужність двигуна P завжди менше потужності, яку АД споживає з мережі P_{in} , на величину втрат потужності ΔP .

Потужність, яку АД споживає з мережі в номінальному режимі:

$$P_{in nom} = \frac{P_N}{\eta_N}.$$

Втрати потужності в електричних машинах ΔP поділяються на основні та додаткові. Основні втрати потужності складаються з магнітних, електричних та механічних втрат потужності.

При розрахунках слід прийняти значення:

- механічні втрати потужності, $P_{mec} = 0,02 P_N$;
- магнітні втрати потужності, $P_{mag} = 0,01 P_N$;
- додаткові втрати потужності, $P_{ad} = 0,005 P_N$.

Для інженерних розрахунків можна прийняти, що механічні і магнітні втрати потужності постійні і разом дорівнюють втратам потужності в режимі неробочого ходу. Додаткові втрати з достатньою точністю також можна віднести до постійних втрат. В них включають всі види інших втрат, що не враховані вище: від дії вищих гармонік МРС, від пульсацій магнітної індукції в зубцях та інші.

При частоті напруги в мережі $f = 50$ Гц і діапазоні номінального ковзання двигунів $s_N = 2-8$ % частота перемагнічування ротора знаходиться в межах кількох герц ($f_r = f_s \cdot s_N = 1-4$ Гц). Тому магнітні втрати в осерді ротора на практиці не враховують і на енергетичній діаграмі не показують. Загальні магнітні втрати потужності дорівнюють магнітним втратам потужності в осерді статора:

$$P_{mag} = P_{mag.s}.$$

Електричні втрати потужності в обмотках статора і ротора асинхронного двигуна P_{el} змінні і залежать від навантаження:

- 1) електричні втрати потужності в обмотці статора в номінальному режимі:

$$P_{el.s nom} = m_s \cdot I_{sN}^2 \cdot R_s,$$

де I_{sN} – номінальний струм статора:

$$I_{sN} = \frac{P_{in nom}}{m_s \cdot U_{sN} \cdot \cos \varphi_N};$$

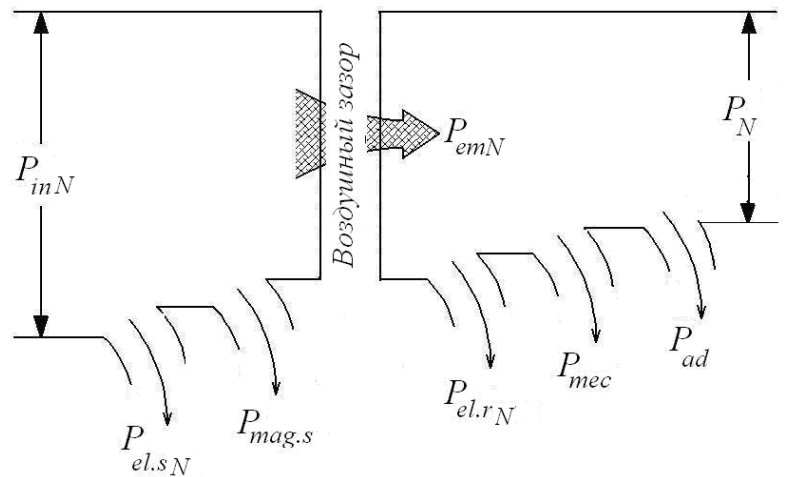


Рисунок 4 – Енергетична діаграма асинхронного двигуна

U_{sN} – фазна напруга обмотки статора, яка при з'єднанні у «зірку»:

$$U_{sN} = \frac{U_N}{\sqrt{3}};$$

2) електричні втрати потужності в обмотці ротора прямо пропорційні ковзанню:

$$P_{el.r} = s \cdot P_{em},$$

де P_{em} – електромагнітна потужність асинхронного двигуна:

$$P_{em} = P_{innom} - (P_{mag} + P_{el.s}).$$

Загальні втрати потужності асинхронного двигуна при навантаженні, яке залежить від коефіцієнту струму навантаження β_{Is} , що характеризує частку від номінального навантаження:

$$\Delta P_{nom} = P_{mag} + P_{mec} + P_{ad} + \beta_{Is}^2 \cdot (P_{el.snom} + P_{el.rnom}),$$

де $P_{el.snom}$ і $P_{el.rnom}$ – електричні втрати потужності в обмотках статора і ротора (відповідно) в номінальному режимі.

При номінальному навантаженні $\beta_{Is} = \beta_{IsN} = 1$.

Побудуйте в масштабі енергетичну діаграму АД (приклад енергетичної діаграми асинхронного двигуна приведено на рис. 6, де окрім вже названих величин позначено P_{mc} – механічна потужність; P_{out} – вихідна потужність). Біля кожного значення потужності та втрат потужностей проставте їх чисельні значення.

Розрахуйте, згідно побудованій діаграмі, номінальний ККД двигуна:

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_{innom}} = 1 - \frac{\Delta P_{nom}}{P_{innom}},$$

де ΔP_{nom} – сумарні втрати потужності двигуна у номінальному режимі, які складаються з постійних і змінних втрат потужності у номінальному режимі:

$$\Delta P_{nom} = P_{const} + P_{var nom}.$$

Сума постійних втрат потужності в АД:

$$P_{const} = P_{mag} + P_{mec} + P_{ad}.$$

Сума змінних втрат потужності в АД в номінальному режимі:

$$P_{varnom} = P_{el.snom} + P_{el.rnom}.$$

Порівняйте отримане значення ККД з заданим в табл. 5.

При розв'язанні задачі № 2 використовуйте отримане значення.

2.2.2 Методичні вказівки до рішення задачі № 2

При виборі значень опору пускових реостатів прийняти обмеження пускового струму ротора (I'_{r1}) значенням двох номінальних струмів:

$$I'_{r1} = 2I'_{rN}.$$

При роботі зі зведеними параметрами обмотки ротора АД вважаємо, що $I_s = I'_r$.

Електромагнітний момент асинхронного двигуна:

$$M = \frac{m_s \cdot U_{sN}^2 \cdot R'_r \cdot p}{2\pi \cdot f \cdot s \cdot \left[\left(R_s + R'_r / s \right)^2 + \left(X_s + X'_r \right)^2 \right]}.$$

Зведене значення струму ротора асинхронного двигуна:

$$I'_r = \frac{U_{sN}}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + \left(X_s + X'_r \right)^2}}.$$

Значення зведеного струму ротора при прямому пуску ($s = 1$):

$$I'_{r1} = \frac{U_{sN}}{\sqrt{\left(R_s + R'_r \right)^2 + \left(X_s + X'_r \right)^2}}.$$

Значення електромагнітного моменту при прямому пуску ($s = 1$):

$$M_1 = \frac{m_s \cdot U_{sN}^2 \cdot R'_r \cdot p}{2\pi \cdot f \cdot \left[\left(R_s + R'_r \right)^2 + \left(X_s + X'_r \right)^2 \right]}.$$

Визначте перевищення пускового струму при прямому пуску:

$$K_{I1} = \frac{I'_{r1}}{I'_{rN}}.$$

З наведеного нижче рівняння визначте зведений опір пускового реостату R'_{reos} , який забезпечить обмеження пускового струму дворазовим значенням номінального струму:

$$I'_{r1} = 2I'_{rN} = \frac{U_{sN}}{\sqrt{\left(R_s + R'_r + R'_{reos} \right)^2 + \left(X_s + X'_r \right)^2}},$$

де R'_{reos} – сумарне значення опору трьох ступенів пускових реостатів.

Розділіть значення отриманого опору на три ступені:

$$R'_{reos1} = R'_{reos2} = R'_{reos3} = R' = \frac{R'_{reos}}{3}.$$

Розрахуйте електромагнітний момент двигуна з k ступенями пускових реостатів, ($k = 1, 2, 3$) при різних значеннях ковзання s , які наведено в табл. 6:

$$M = \frac{m_s \cdot U_{sN}^2 \left(R'_r + k \cdot R' \right) \cdot p}{2\pi \cdot f \cdot s \left\{ \left[R_s + \left(R'_r + k \cdot R' \right) / s \right]^2 + \left(X_s + X'_r \right)^2 \right\}}.$$

Критичне ковзання s_{cr} , яке відповідає максимальному електромагнітному моменту асинхронного двигуна без пускового реостата:

$$s_{cr} \approx \frac{R'_r}{X_s + X'_r}.$$

Максимальний електромагнітний момент АД при критичному ковзанні:

$$M_{max} = \frac{m \cdot U_{sN}^2 \cdot p}{4\pi \cdot f \cdot \left(X_s + X'_r \right)}.$$

Значення максимального електромагнітного моменту при введенні пускових реостатів не змінюється, тому що не залежить від критичного ковзання.

Таблиця 6 – Параметри розрахунків характеристик $M(s)$, $I'_r(s)$.

Кількість ступенів реостатів	Параметр	Значення ковзання s								
		0	s_N	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	$s_{cr.kR}$	1
–	$I'_r, \text{ А}$		I'_{rN}							
	$M, \text{ Н}\cdot\text{м}$									
+ R'	$I'_r, \text{ А}$									
	$M, \text{ Н}\cdot\text{м}$									
+ $2R'$	$I'_r, \text{ А}$									
	$M, \text{ Н}\cdot\text{м}$									
+ $3R'$	$I'_r, \text{ А}$									$2I'_{rN}$
	$M, \text{ Н}\cdot\text{м}$									

Розрахуйте значення критичних ковзань АД з k ступенями реостатів, які введені до обмотки ротора:

$$s_{cr.R} \approx \frac{R'_r + R'_r}{X_s + X'_r}; \quad s_{cr.2R} \approx \frac{R'_r + 2R'_r}{X_s + X'_r}; \quad s_{cr.3R} \approx \frac{R'_r + 3R'_r}{X_s + X'_r}.$$

Побудуйте чотири характеристики $I'_r(s)$ на одному графічному полі, а саме: характеристику без пускових реостатів і три характеристики з однією, двома і трьома ступенями пускового реостата.

На тому ж графічному полі побудуйте чотири характеристики $M(s)$ в окремому масштабі, а саме: одну – без реостатів і три характеристики з однією, двома і трьома ступенями реостатів.

Вкажіть на побудованих графіках, при яких значеннях ковзання виводять кожну чергову ступень реостату.

Закінчуючи розрахунки, зазвичай визначають не зведене (R'_{reos}), а дійсне значення опору пускових реостатів, R_{reos} , але для цього треба багато додаткових даних АД. При їх наявності дійсне значення опору пускових реостатів можливо розрахувати по наведеному нижче алгоритму:

$$R_{reos} = \frac{R'_{reos}}{k_u \cdot k_i},$$

де k_u – коефіцієнт трансформації напруг, який дорівнює

$$k_u = \frac{K_{Ws} \cdot N_s}{K_{Wr} \cdot N_r};$$

k_i – коефіцієнт трансформації струмів, який дорівнює

$$k_i = \frac{m_s \cdot N_s \cdot K_{Ws}}{m_r \cdot N_r \cdot K_{Wr}};$$

m_s та m_r – кількість фаз обмотки статора і ротора відповідно, (для АД з фазним ротором $m_s = m_r = 3$);

N_s та N_r – кількість витків на фазу обмоток статора і ротора відповідно;

K_{Ws} та K_{Wr} – обмоткові коефіцієнти обмотки статора та фазної обмотки ротора, відповідно.

3 ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

3.1 Теоретичне завдання

Опишіть особливості конструкції роторів синхронних генераторів (СГ), які використовують на теплових (у тому числі, атомних) електростанціях, на гідроелектростанціях. Поясніть відмінність конструкцій роторів цих генераторів. Наведіть ескізи явно- і неявнополюсного роторів.

Опишіть способи збудження і основні етапи точної і «грубої» синхронізації (самосинхронізації) СГ. Запишіть вимоги щодо включення СГ на паралельну роботу з мережею при точній синхронізації.

3.2 Задача

Побудувати кутову характеристику трифазного ($m_s=3$, де m_s – кількість фаз) явнополюсного СГ за даними, наведеними в табл. 7, і розрахувати його перевантажувальну здатність. Порівняти кутові характеристики трифазних явнополюсних і неявнополюсного СГ; пояснити, чому вони різні.

3.3 Методичні вказівки до розв'язання задачі

Розрахуйте номінальне фазне значення напруги обмотки статора:

$$U_{sN} = \frac{U_N}{\sqrt{3}}.$$

В синхронних машинах електромагнітний момент M_{em} пропорційний електромагнітної потужності P_{em} . Тому можна будувати кутову характеристику як залежність $M_{em}(\theta)$ або як $P_{em}(\theta)$, де θ – кут навантаження («вилиту»), кут між вектором ЕРС E_{so} , яку наводить потік обмотки ротора (потік збудження) в обмотці статора, та вектором напруги статора U_s .

Побудуйте кутову характеристику $P_{em}(\theta)$:

$$P_{em} = \frac{m_s \cdot U_{sN} \cdot E_{so}}{X_d} \cdot \sin \theta + \frac{m_s \cdot U_{sN}^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \cdot \sin 2\theta, \quad (3.1)$$

Позначимо

$$A = \frac{m_s \cdot U_{sN} \cdot E_{so}}{X_d}; \quad B = \frac{m_s \cdot U_{sN}^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right).$$

Таблиця 7 – Дані трифазного синхронного генератора

Номер варіанту	Номінальна напруга обмотки статора	Номінальний коефіцієнт потужності	Відносне значення ЕРС, яка наводиться потоком збудження в обмотці статора	Поперечний індуктивний опір	Поздовжній індуктивний опір	Кут між вектором струму обмотки статора та вектором ЕРС статора	Схема з'єднання обмотки статора
	U_N , кВ	$\cos\varphi_N$	$E_{so}^* = \frac{E_{so}}{U_{sN}}$, в.о.	X_q , Ом	X_d , Ом	ψ_N , ел. град.	
1	6,0	0,90	1,67	4,21	6,42	52	Y
2	0,38	0,91	1,69	0,935	1,42	54	Y
3	10,0	0,92	1,71	5,35	8,82	53	Y
4	6,0	0,93	1,64	2,48	3,82	52	Y
5	6,0	0,90	1,62	3,12	5,04	54	Y
6	0,38	0,89	1,66	5,20	7,46	54	Δ
7	0,38	0,89	1,72	4,02	6,18	52	Y
8	6,0	0,90	1,63	2,12	3,44	53	Y
9	6,0	0,91	1,67	1,96	3,12	52	Y
10	10,0	0,90	1,60	5,00	7,36	54	Y
11	10,0	0,91	1,59	3,18	6,84	50	Y
12	6,0	0,92	1,70	5,10	7,44	51	Y
13	6,0	0,93	1,71	4,18	6,54	52	Y
14	6,0	0,92	1,62	5,24	7,85	54	Y
15	0,23	0,91	1,75	3,36	5,68	55	Δ
16	0,38	0,90	1,78	5,12	8,20	54	Y
17	0,38	0,89	1,72	6,30	9,20	54	Δ
18	0,66	0,88	1,73	6,04	9,28	52	Δ
19	0,66	0,89	1,72	4,12	6,64	54	Δ
20	6,0	0,90	1,78	5,20	8,10	55	Y
21	10,0	0,91	1,70	4,32	6,56	52	Y
22	10,0	0,92	1,74	6,12	9,43	54	Y
23	6,0	0,91	1,72	4,11	6,42	52	Y
24	0,38	0,88	1,73	2,35	4,12	54	Y

Примітка: E_{so} – ЕРС, яку наводить магнітний потік обмотки збудження в обмотці статора в режимі навантаження: $E_{so} = E_{so}^* \cdot U_{sN}$.

Тоді рівняння (3.1) запишемо:

$$P_{em} = A \cdot \sin\theta + B \cdot \sin 2\theta, \quad (3.2)$$

Дані розрахунків кутової характеристики занести в табл. 8.

Таблиця 8 – Розрахунок кутової характеристики явнополюсного синхронного генератора

Параметр	Значення кута навантаження θ , ел. град									
	0	θ_N	30	60	θ_{cr}	90	120	135	150	180
$\sin\theta$										
$A \cdot \sin\theta$, Вт										
$\sin 2\theta$										
$B \cdot \sin 2\theta$, Вт										
$P = A \cdot \sin\theta + B \cdot \sin 2\theta$, Вт										

Кутові характеристики синхронних генераторів з явнополюсними и неявнополюсними конструкціями роторів різні, тому що у явнополюсних генераторів $X_q < X_d$, а у неявнополюсних генераторів можна вважати $X_q = X_d$.

Критичний кут навантаження, при якому електромагнітна потужність буде максимальною, можна розрахувати:

$$\theta_{cr} = \arccos(\sqrt{\beta^2 + 0,5} - \beta),$$

де розрахунковий коефіцієнт може бути розраховано:

$$\beta = \frac{E_{so}}{4 \cdot U_{sN} \cdot \left(\frac{X_d}{X_q} - 1 \right)}.$$

Номінальний кут навантаження:

$$\theta_N = \psi_N - \varphi_N,$$

де ψ_N – кут між вектором струму обмотки статора I_s в номінальному режимі і вектором ЕРС E_{so} .

φ_N – кут між вектором фазної напруги U_{sN} і вектором фазного струму обмотки статора I_{sN} в номінальному режимі. Його значення встановлюємо за даними табл. 8 через $\cos\varphi_N$.

Приклад кутової характеристики синхронного генератора с явнополюсною конструкцією ротора (гідрогенератор) представлено на рис. 5.

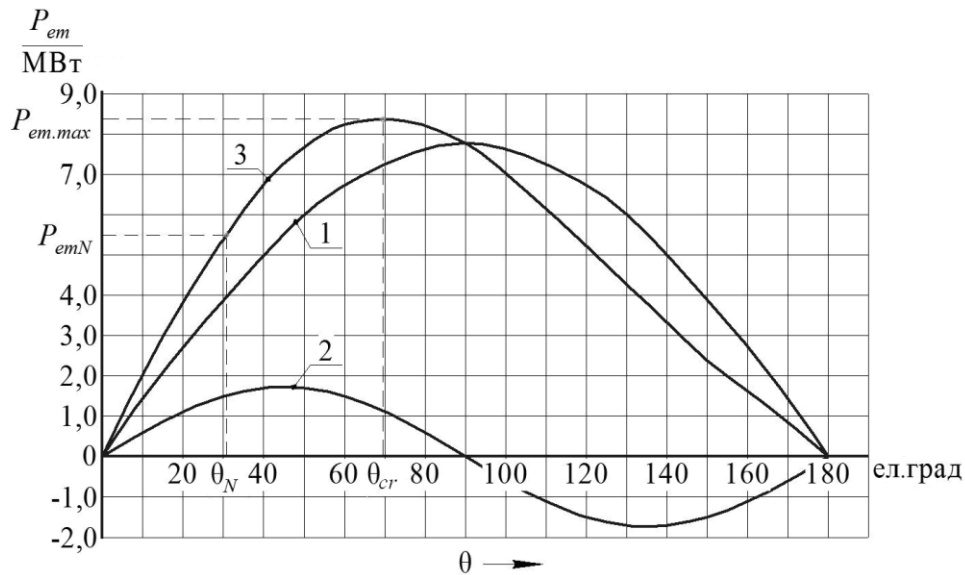


Рисунок 5 – Кутова характеристика синхронного генератора з явнополусною конструкцією ротора

Графік кутової характеристики (крива 3) синхронного генератора с явнополусною конструкцією ротора (рис. 5) фактично є сумою двох характеристик – першої (графік 1) та другої складових (графік 2) формули (4.1).

Тому графік 3 (рис. 5) можна побудувати аналітично, використовуючи значення останньої функції в табл. 8, або спочатку побудувати графіки першій і другій складових (другий та четвертий рядки в табл. 8, графіки 1 і 2 рис. 5), а потім графічно їх додати.

Електромагнітна потужність $P_{em.max}$ при куті навантаження θ_{cr} максимальна. Для явнополусного синхронного генератора зазвичай кут $\theta_{cr}=75 - 80$ ел.град.

Розрахуйте коефіцієнт статичного перевантаження (перевантажувальну здатність) синхронної машини

$$K_{Mm} = \frac{P_{em.max}}{P_{em.N}},$$

де $P_{em.N}$ береться при θ_N .

Для генераторів, які встановлені на електростанціях, значення K_{Mm} знаходиться в межах:

- для гідрогенераторів $K_{Mm}=1,3-1,5$;
- для турбогенераторів $K_{Mm}=1,6-1,8$.

4 ОПИС КОНСТРУКЦІЙ ВИСОКОВОЛЬТНИХ АПАРАТІВ ТА ЗАСОБИ ГАСІННЯ В НИХ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ

4.1 Теоретичне завдання

4.1.1 Опишіть:

- роль електричних апаратів у виробництві і розподілі електроенергії;
- електричний апарат як засіб керування потоками енергії від джерела до споживача;
- загальна характеристика і класифікація електричних апаратів;
- принцип дії електричних апаратів, вимоги, що пропонувані до них.

4.1.2 Опишіть умови горіння й гасіння дуги постійного та перемінного струму та засоби гасіння дуги в дугогасильних камерах

4.2 Методичні вказівки

До питання 4.1.1:

- скласти класифікацію електричних апаратів по ознаках, вказати їх основні характеристики;
- вказати призначення апаратів, принципи дії й області застосування;
- сформулюйте визначення понять: електричний апарат, електрична дуга;
- провести поелементний аналіз конструкції апарата з переліком основних окремих його елементів;

Електричні апарати – являють собою засоби керування електричним струмом, функції яких полягають у керуванні параметрами, що характеризують струм: електричною напругою, електричною потужністю й енергією, частотою електричного струму, його силою, формою імпульсу струму (напруги), магнітним потоком і т.п.

У залежності від призначення апарати можна розділити на наступні великі групи: комутаційні, обмежуючі, захисні, пускорегулюючі, контролюючі, вимірювальні, регулюючі й апарати керування. Також апарати поєднують у групи апаратів розподільних пристроїв низької і високої напруги.

В першу чергу необхідно зрозуміти роль апаратів у розподілі електроенергії, вивчити їхню класифікацію, загальну характеристику, основні шляхи розвитку апаратобудування.

Основними елементами апаратів є: струмоведуча частина (контактна і дугогасильна системи) і привод, механізм і інші пристрої, що забезпечують переміщення контактів при включенні і відключенні.

Електричні апарати повинні виконуватися так, щоб: зменшити час горіння дуги, зменшити перенапруги, що виникають при комутаціях, зменшити викид полум'я, зменшити знос контактів і дугогасильних камер, зменшити ймовірність приварювання контактів та перегріву.

Електричним контактом називається з'єднання двох провідників, що дозволяє проводити струм. Самі провідники називаються контактними елементами або просто контактами.

При замиканні і розмиканні ланцюга контакти зношуються. Конструкція повинна бути такою, щоб знос контактів у продовж передбаченого числа комутаційних операцій не приводив до порушення роботи вимикача.

Як правило знос комутаційних контактів викликається головним чином електричним струмом. Також контакти зношуються і при замиканні і розмиканні.

Великий вплив на ступінь зносу роблять матеріал контактів, частота операцій, напруга мережі, число розривів при розмиканні ланцюга, конструкція контактів, кривизна контактної поверхні, сили натискання, маса контактів і швидкість їхнього зближення при розмиканні.

Після зіткнення двох тіл між ними виникає сила зчеплення, тим більша, чим з великою силою вони були притиснуті. Якщо остання має достатню величину, то виходить міцне з'єднання (холодне зварювання). Нагрівання поверхонь зіткнення твердих тіл сприяє їхньому зварюванню. Сили зчеплення відразу істотно зростають, коли досягнута температура розм'якшення (рекристалізації). Найбільші сили виникають, коли досягнута температура плавлення.

Автоматичні вимикачі (автомати) служать для відключення електричного ланцюга в нормальних і аварійних режимах – перевантаженнях, коротких замиканнях, неприпустимому зниженні напруги живлення, зміні напрямку потужності і т.д., автоматом можна також користатися для рідких включень і відключень номінальних струмів навантаження.

Автомати розрізняються по їхній швидкодії, що характеризується власним часом спрацьовування. Розрізняють швидкодіючі і нешвидкодіючі автомати.

До окремої групи відносять автомати гасіння поля, що відключають обмотки збудження генераторів з появою короткого замикання в головному ланцюзі генератора.

Необхідно звернути увагу на розходження у відключенні струмів короткого замикання швидкодіючим і нешвидкодіючим автоматом, знати основні конструктивні елементи автоматів, зокрема механіку вільного розчіплювання, а також види і конструкції розчіплювачів.

При вивченні типів розчіплювачів необхідно враховувати різницю в підключенні і конструкції електромагнітного та теплового розчіплювача.

Запобіжники - це електричні апарати, призначені для захисту електроустановок від перевантажень і струмів короткого замикання. При струмі, більшому за даної величини, запобіжник розмикає електричний ланцюг шляхом розплавлення плавкого елемента, нагрітого струмом.

Запобіжники розрізняють по класифікаційних ознаках, загальним для всіх апаратів. При вивченні запобіжників потрібно знати конструкції запобіжників, принцип дії, процес плавлення плавкого елемента й утворення дуги, необхідно звернути увагу на необхідність узгодження характеристик запобіжників з характеристиками об'єкта, що захищається, параметри запобіжників.

До питання 4.1.2:

- описати особливості виникнення дуги;
- описати принцип дії дугогасильних камер, умови гасіння дуги.
- описати особливості гасіння дуги перемінного й постійного струму.

Електрична дуга виникає при розмиканні контактів, що створює сильно іонізований стовп газу, що став струмопровідним під впливом високої температури.

Якщо потужність, що відключає, невелика, між контактами виникає лише іскра, що практично не залишає на них ніяких слідів. У цьому випадку розмикання кола завершується без ускладнень після розбіжності контактів на повну довжину міжконтактного проміжку. При великих потужностях відключення виникає електрична дуга, під дією якої контакти обгорають. Це вимагає створювати спеціальні пристрої для розмикання електричного кола.

У дуговому розряді можна розрізнити три характерні області: біля-катодну, область стовбура дуги й біля-анодну область. У кожній з цих областей процеси іонізації протікають по різному в залежності від умов, що там існують.

Основною характеристикою дуги є її вольт-амперна характеристика. Її форма і розташування залежать від швидкості зміни струму в дузі, довжини дуги та інших факторів.

Процес відключення кола постійного струму можна розбити на три послідовні фази, що сліднують дуже швидко і без пауз одна за іншою:

- розмикання контактів і виникнення дуги;
- гасіння дуги;
- відновлення електричної міцності дугового проміжку, що перешкоджає повторному запалюванню дуги.

Дуга перемінного струму відрізняється від дуги постійного струму тим, що її струм проходить через нуль кожний полуперіод. Ця обставина сприятливе впливає на гасіння дуги, якщо коло струму розмикається в момент переходу струму через нуль або в безпосередній близькості від цього моменту.

Самим простим засобом гасіння дуги є її розтягання. Але більш важливе обмежити поширення дуги і її полум'я, та погасити дугу в малому обсязі, що необхідно для створення компактних апаратів. Для цього створюють дугогасильні пристрої. Для визначення конструкції дугогасильної камери і засобів горіння дуги слід знати які фактори впливають на процес виникнення дуги, її розвитку і необхідні умови припинення горіння дуги. Також слід знати які існують способи гасіння дуги.

Слід розглянути особливості гасіння дуги в дугогасильних камерах. Окремо необхідно визначити вплив електромагнітного поля на дугу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Токарев Б.И. Электрические машины. Учебник. – М.: Энергоатомиздат, 1993.- 424 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. Учебник. – Л.: Энергия, 1979.– 816 с.
3. Мілих В.І. Електротехніка та електромеханіка: Навч. посібник. – К.: «Каравела», 2006.– 376 с.
4. Мілих В.І., Шавьолкін О.О. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка: Підручник. За ред. В.І. Мілих. – К.: «Каравела», 2007. – 688 с.
5. Копылов И.П. Электрические машины. Учебник.– М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
6. Кацман М.М. Электрические машины. Учебник. – М.: Высшая школа, 1990, 2000, 2006.

7. Міліх В.І. Літерні позначення величин та параметрів електричних машин. Методичні вказівки до використання в навчальному процесі кафедри «Електричні машини». – Х.: НТУ «ХП», 2007. – 31 с.
8. Чунихин А.А. Электрические аппараты. - Москва: Энергоатомиздат, 1988. - 720 с.
9. Таев И.С. Основы теории электрических аппаратов. – Москва: Высшая школа, 1987. – 448 с.
10. Кузнецов Р.С. Аппараты распределения электрической энергии на напряжение до 1 кВ. - Москва: Энергия, 1980. - 540 с.
11. Александров Г.Н. Теория электрических аппаратов - Москва: Высшая школа - 1985. - 312 с.

Приклад оформлення титульного листа розрахункових завдань

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»**

Кафедра електричних машин

**РОЗРАХУНКОВІ ЗАВДАННЯ
ПО ДИСЦИПЛІНІ
«ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ І АПАРАТИ»**

студента 2 курсу групи _____

(прізвище, ім'я, по-батькові студента)

Назва розділу	Дата виконання, оцінка, підпис викладача
1 Розрахунок параметрів трансформаторів в номінальному режимі по результатам випробувань в режимах неробочого ходу та лабораторного короткого замикання	
2. Енергетична діаграма та вибір пускових реостатів для асинхронного двигуна	
3. Визначення перевантажувальної здатності синхронного генератора	
4 Опис конструкцій високовольтних апаратів та засоби гасіння в них електричної дуги	

Харків 20__ р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ТРАНСФОРМАТОРІВ В НОМІНАЛЬНОМУ РЕЖИМІ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВИПРОБУВАНЬ В РЕЖИМАХ НЕРОБОЧОГО ХОДУ ТА ЛАБОРАТОРНОГО КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ	4
1.1 Теоретичне завдання	4
1.2 Задача	4
1.3 Методичні вказівки до розв'язання задачі.....	7
2 ЕНЕРГЕТИЧНА ДІАГРАМА ТА ВИБІР ПУСКОВИХ РЕОСТАТІВ ДЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА	13
2.1 Задачі	13
2.2 Методичні вказівки до розв'язання задач	14
3 ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА.....	21
3.1 Теоретичне завдання	21
3.2 Задача	21
3.3 Методичні вказівки до розв'язання задачі	21
4 ОПИС КОНСТРУКЦІЙ ВИСОКОВОЛЬТНИХ АПАРАТІВ ТА ЗАСОБИ ГАСІННЯ В НИХ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ	25
4.1 Теоретичне завдання	25
4.2 Методичні вказівки	25
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ	28
ДОДАТОК А Приклад оформлення титульного листа розрахункових завдань	30

Навчальне видання

РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРІВ, ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН ТА АПАРАТІВ

Контрольні питання, розрахункові завдання і методичні вказівки
з дисципліни «ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ТА АПАРАТИ»

для студентів
навчально-наукового інституту енергетики, електроніки
та електромеханіки

У к л а д а ч і :
ШЕВЧЕНКО Валентина Володимирівна
ДУНЄВ Олексій Олександрович

Відповідальний за випуск *А.В. Єгоров*

Роботу до видання рекомендував *проф. Б.Г. Любарський*

План 2019 р., поз. 181.

Підп. до друку 21.06.2019. Формат 60×84 1/16. Папір офісний. *Riso* – друк.

Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 1,7. Обл.- вид. Арк. 2,0. Наклад 50 прим.

Зам. № 194200. Ціна договірна.

Видавництво «Стильна типографія».

Свідоцтво суб'єкта видавничої діяльності ДК №5493 від 22.08.2017 р.

61002, Харків, вул. Чернишевського, 28А